

解 説**ホログラフィによる立体像表示**

久保田 敏弘

京都工芸繊維大学工業短期大学部写真工学科 〒606 京都市左京区松ヶ崎橋上町

(1987年7月1日受理)

Display of Three-Dimensional Images by Holography

Toshihiro KUBOTA

Department of Photographic Technology, Kyoto Institute of Technology,
Matsugasaki, Sakyo-ku, Kyoto 606**1. はじめに**

従来からある立体視の技術は、立体感の諸要因のうちすべて輻輳と両眼視差の二つの要因に訴えるものであった。これに対し、ホログラフィによって初めて前記二つの要因に加えて眼の焦点調節にも矛盾のない立体感を与えることができるようになった。その意味でホログラフィの最大の特徴は完全な立体像が再生できることにある。

この特徴を生かして立体像表示の手段としてホログラフィが使えるようになるためには、被写体に制限がなく、またレーザー光ではなく白色光源で再生できることが必要であった。そこで、ホログラフィの本質は失わずにその長所をある程度犠牲にして、また従来の立体視技術を一部取り入れることによって実用的な白色光再生ホログラムが開発された。この辺までの経緯については、本誌第8巻 No. 4 (1979)、第11巻 No. 1 (1982)に報告されている。それ以後この白色光再生ホログラムを中心に、より高度なディスプレイを目指して種々の技術、たとえば広視域化、カラー化・無色化、被写体の制限緩和などが研究されてきた。一方、より優れた銀塩乳剤、重クロム酸ゼラチン、フォトポリマーなど記録材料の開発および現像処理法の改良なども続けられている。複製技術に関してはほぼ完成した域に入っており、世界的なクレジットカード会社のプラスチックカードに偽造防止用として精巧な複製ホログラムが貼付されるまでになった。本報告では、ホログラフィによる立体像表示について、最近の技術動向を中心に紹介する。

2. ディスプレイホログラムの種類と表示方式**2.1 種類**

ホログラムを物体とホログラムの位置関係から分類すればフレネルホログラム、フーリエ変換ホログラム、イメージホログラムとなる。これらの基本的なホログラムのいずれれもが透過型ホログラムにもリップマンホログラム(反射型ホログラム)にもなり、これらに種々の技術を加えることにより特徴ある利用が可能となる。ディスプレイ用として使用できるホログラムを再生光源で分類すれば、レーザー光再生ホログラムと白色光再生ホログラムとなる。前者では再生像のぼけがなく、奥行の深い立体像をほぼ完全な形で再生できる。そのため、とくに精密を要する画像の記録・保存には適しており、また奥行の深い特殊なディスプレイなどにも利用できる。有名なホログラムとしてはミロのビーナスを記録したものがある。大きな被写体になるほど奥行が深くなるためレーザー光再生が有利になる。

ホログラムは一種の回折格子であり、色収差のため再生像のできる位置は波長によって異なる。したがって普通のレーザー光再生ホログラムを白色光で再生した場合、各波長による再生像が重なってしまい、ぼけた像しか得られない。白色光源で再生してもぼけのない再生像を得るためには再生像をホログラム面上に作るか、白色光のなかから実効的に特定の波長の光のみを取り出して観察すればよい¹⁾。前者の場合がイメージホログラム、後者の場合がレインボーホログラムおよびリップマンホログラムである。レーザー光再生とは異なり波長幅があ

るために、再生像はホログラム面から離れるにしたがって大きくなるが、人間の眼でみて差しつかえない程度に鮮明に見えるように工夫したのがこれらの白色光再生ホログラムである。マルチプレックスホログラムはホログラフィック・ステレオグラムにレインボーホログラムの技術を組み合わせたものである。

2.2 表示方式

ホログラムの種類とは別に、形状により図1に示すように四つの表示方式が考えられる。(a)の平面型は最も基本的な方式であり、ホログラムは垂直で斜め上方あるいは斜め下方から照明し再生する。(b)はマルチプレックスホログラムに代表される方式で円筒型である。円筒中心の上方あるいは下方から照明する。再生像は円筒内部の中心に見え、ホログラムを回転することにより再生像も回転し 360° 方向の像が観察される。被写体の緩やかな動きなら動歪も少なく、動画にすることができる。図のような全円筒型のほかに半円筒型、120° 円筒型もある。(c)のアルコーブ (alcove) 型は、最近 Benton によって提案されたものである²⁾。凹面半円筒型をしておりその中心部に像が再生される。そのため(b)の方式とは異なり、像と観測者の間には何も存在せず実物体が空中に浮かんでいるような印象を与え、ディスプレイの効果は大きい。これらの方式のほかに(d)に示すようにディスク型が考えられる。円盤状のホログラムを水平に置き真上から照明する方式で、円盤の上に実物体があるかのような印象を与え、さらに動画にすることも可能である。

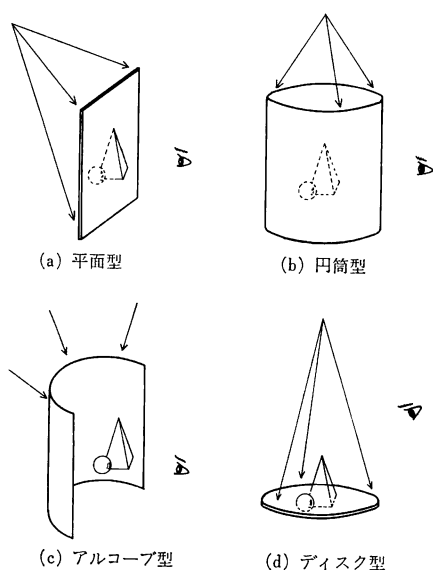


図1 ホログラムの表示方式

3. 新しい表示技術の動向

最近の技術について重要と思われる主なものについて述べる。

3.1 広視域ホログラム

眼を移動させて再生像を観察できる範囲を視域というが、これが広いことが必要である。レインボーホログラムのように二段階でホログラムを記録する場合、マスターホログラムの大きさ(幅)によって視域が制限されるが、2枚の平面鏡を使用して視域を拡げることができる。これはホログラムから外れる物体光を鏡で折り返して記録材料に導き、実効的にマスターホログラムの大きさを拡げようとする考えである。この方法による視域拡大の限界は使用するレーザー光の可干渉距離によって決まる。二つの鏡の間の角度を 15° としたとき、He-Ne レーザーを使用して最大視域約 170° が得られる³⁾。

3.2 再生像のカラー化

再生像のカラー化はホログラフィの究極の目的の一つであって、この要望は最近とくに強くなっている。原理的には三原色に相当する3本のレーザー光を用いて三つのホログラムを記録すれば、加法混色によりカラー像が得られる⁴⁾ わけであるが、カラーホログラフィの研究はそれほど進んではいない。

カラーホログラフィにおいて解決しなければならない最大の問題は、それぞれのホログラムを、記録のときは異なる波長の光で再生したときに生じるクロストーク像をいかに除去するかということにある。

薄いホログラムの場合比較的低解像力の記録材料が使用できるが、再生光学系が複雑でしかもレーザー光再生が必要である。厚いホログラムの場合、透過型ホログラムでは角度選択性には優れているが波長選択性はよくない。10 μm 程度の厚みのホログラムでは白色光再生は無理である。一方、リップマンホログラムは波長選択性が優れており、白色光再生でクロストーク像を生じないため、カラーホログラムの方式としては一番適しているといえる。最近のカラーホログラフィに関する研究はリップマンホログラムが主になってきているが、ここで記録材料の問題が生じてくる。リップマンホログラムの干渉縞の間隔はきわめて狭く 1 mm に数千本以上の解像力をもつこと、さらに多重露光するためダイナミックレンジが広いこと、という厳しい条件が課せられる。明るい再生像が得られるかどうかは使用する記録材料にかかっているといえる。市販のホログラフィ用銀塩乳剤では 649 Fを除いてはパンクロマチックではない。そのため赤の

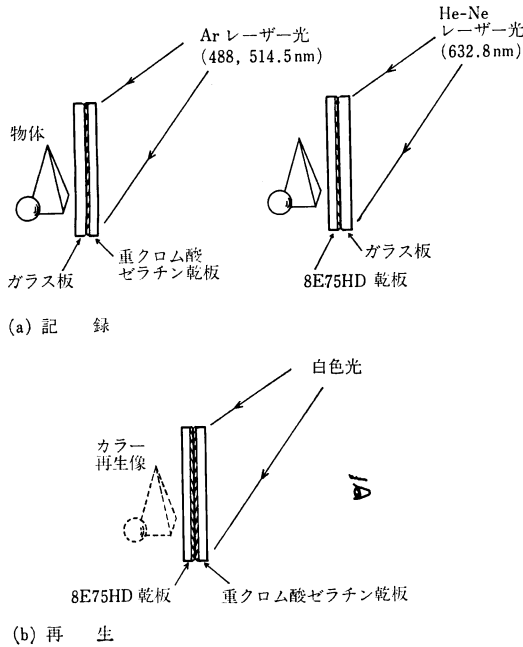


図 2 リップマンカラーホログラムの方式

成分および緑、青の成分のホログラムを別々の乳剤に記録し、それらを貼り合わせる方法がとられる⁵⁾。銀塩乳剤は最近大いに改良されてきているが、短波長の光に対しては依然として解像力不足であり、しかも2重露光しなければならない。この点を考慮し図2に示すように緑、青の光に対してきわめて高い解像力をもつ重クロム酸ゼラチンを使う方法が提案されており、明るいカラー再生像が得られている⁶⁾。他の記録材料として、Polariod社で開発された「フォトポリマー」は重クロム酸ゼラチン並の感度と解像力をもち、しかもパンクロマチックであることから、カラーホログラム用記録材料として有望である。しかし、将来的には感度の点で銀塩乳剤が主流になることは確かである。そのための乳剤の開発、処理法の改良が望まれる。

三原色のレーザー光を使ったナチュラルカラーではなく、擬似カラーの再生像を得る方法も報告されている⁹⁾。

3.3 再生像の無色化

再生像を無色化 (achromatize) する技術も重要である。ホログラムは一種の回折格子であり、白色光で再生すれば色収差が生じることはすでに述べた。そこでそのホログラム H_2 の平均空間周波数と同じ周波数をもったホログラム格子 H_1 を作り、 H_1 からの再生光を H_2 の再生照明光とし色分散を補償するような配置にすれば、無色化されたシャープな再生像が得られることになる。

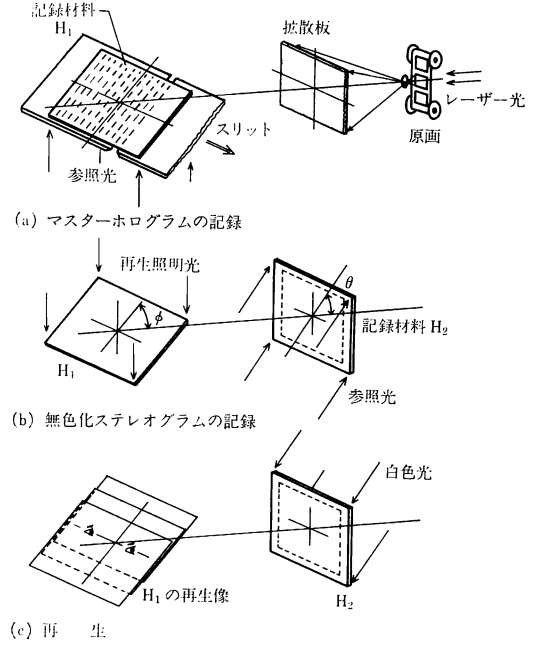


図 3 無色化されたホログラフィック・ステレオグラム

この原理により、透過型のフレネルホログラムを白色光で再生するコンパクトな装置の作製とカラー像再生の可能性について報告がある⁹⁾。

ホログラフィック・ステレオグラムは、複数の異なる視点から見た画像を原画として記録材料にホログラフィックに合成したものである。Bentonはこのステレオグラム再生像の無色化の方法を提案した¹⁰⁾。図3(a)において、ホログラフィック・ステレオグラムを記録する際記録材料 H_1 を傾けて置く。次に(b)のように H_1 を記録のときの参照光と共役な光で再生し、原画の再生像面に記録材料 H_2 を置き参照光として平行光を加えてホログラムを記録する。このホログラム H_2 を(c)のように記録のときの参照光の方向とは逆向きから白色平行光で再生すれば、波長によって上下方向に異なった位置に H_1 の像が再生される。この位置において、 H_1 の傾き角 ϕ と H_2 の参照光の角度 θ が

$$\tan \phi = \sin \theta \quad (1)$$

の関係があれば、色のずれた H_1 の全ての像が同じ倍率ではほぼ同じ面内で重なる。そのためこの面に眼を置けばほとんど無色化された立体像をみることができる。この角度 ϕ を achromatic angle と呼んでいる。 H_1 を原画の面に対して平行に置いた場合と異なり、視差の異なる像がそれぞれの眼に混入することがなく、シャープな像が得られる。

この技術を CT 画像を使った多重断層ホログラムに適用し、各断層ごとに色の異なったコントラストの高い再生像を得る方法も報告されている¹¹⁾。

3.4 計算機による原画の作成と処理

最近のコンピューターグラフィックスの進歩は目ざましいものがあり、きわめて精巧な画像を比較的短時間のうちに描くことができ、しかもその画像は陰画、陰線処理により、また動きを与えて立体運動現象を利用することにより心理的に現実に近い立体感を与えることができる。ホログラフィック・ステレオグラムの原画として計算機で作成された画像を用いようとする考えは自然であり、これにより心理的に立体感をもつ画像ではなく“架空物体”の現実の立体像が得られる。単に視差の異なる画像を描くだけでなく、計算機を介することにより再生像に生ずる歪を前もって計算し補正された原画を得ることができること、また既存の画像を目的に応じて処理できることから computer graphic hologram による立体像表示がホログラフィの研究の一つの方向になりつつある。

その一つが前述したアルコーブホログラム²⁾である。直径 600 mm、高さ 30 mm の凹面半円筒型ホログラムの中心部に計算機で精密に設計された被写体の立体実像が浮かびあがり、180°の広い範囲からそれを見ることができる。図 4 (a)はこのホログラム記録光学系のご概念

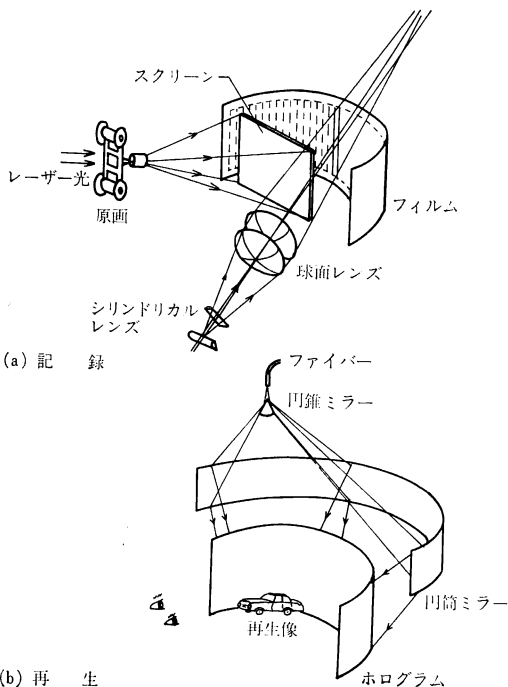


図 4 アルコーブホログラム

図である。計算機で作成された 960 枚の原画は 35 mm シネフィルムに収められ、その一こま一こまがスクリーン上に拡大投影される。このスクリーンはホログラフィックに作成された光学素子で、幅 1 mm の縦長の要素ホログラム上に物体光を有効に集めるように工夫されている。参照光はシリンダリカルレンズと球面レンズの組合せにより、水平方向には円筒フィルムの中心点にいったん集光するように、垂直方向にはこのホログラムを再生する際の再生照明光源点に対応する斜め上方の点に集光するように導入される。原画を一こま一こま換えながらフィルムを幅 1 mm ずつ移動させて順次露光する。図 4 (b)は再生光学系を示す。光ファイバーから出た光は円錐ミラーで反射され、さらに大きなシリンダリカルミラーで反射されてホログラムを照明する。再生像には垂直方向と水平方向とで違ったメカニズムで像が再生されるためマルチプレックスホログラムの場合と同様歪が生ずる。この問題はその歪をあらかじめ計算し、原画を歪ませておくことにより解決している。作成されたホログラムは透過型であり記録、再生ともアルゴンレーザーを使って行なわれた。将来はリップマンホログラムによるカラー像再生を目指しているという。

ホログラフィによる立体像表示の重要な応用の一つに医学への応用がある。医用画像を計算機によって処理した好例として、CT 画像からマルチプレックスホログラムを合成した例がある¹²⁾。原画は 2 mm 間隔で撮影された 93 枚の頭部 CT 画像である。まずこの画像に適当な値を設定して骨部だけを抽出する。次にこの処理された 93 枚の断層画像から、頭蓋骨を体軸と直角方向から見た多くの平面画像に変換する。この画像を基にして作成されたマルチプレックスホログラムの再生像を図 5 に示す。再生像は 360°の方向から見ることができ、しかも

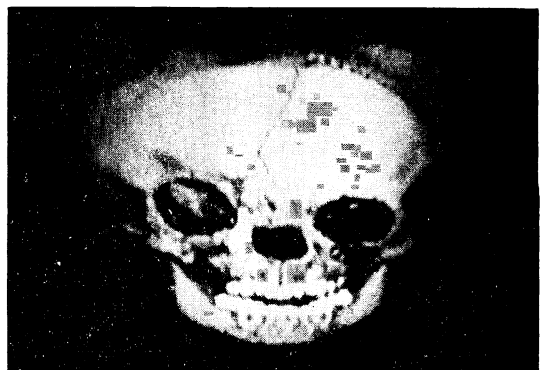


図 5 マルチプレックスホログラムから再生された頭蓋骨の像¹²⁾

注目したい骨部だけの立体像がコントラストよく再生される。このような医用ホログラムの利用価値は手術前に全体の構造を頭に入れておくことができること、骨の手術後に顔・形がどう変わるかのシミュレーションができることなどにあり、また奇形の標本としても使うことができる。

3.5 複製技術の進展

ホログラムの複製は大別して

- (1) 光学的複製
- (2) プレス複製

の二つになる。光学的複製はオリジナルホログラムと複製されるべき新しい記録材料を密着しあるいは距離を置いて配置し、オリジナルホログラムに記録されている干渉縞を再記録するものである。リップマンホログラムはこの方法によって複製される。一方、プレス複製は干渉縞を表面の凹凸として記録できる透過型の平面ホログラムおよび円筒型ホログラムに適用でき、複製されるホログラムとしては白色光再生可能なレインボーホログラムがその代表である。最近では、マルチプレックスホログラムでも複製品が作られるようになった。プレススタンプとよばれるプレス原版を一枚作っておけば、安価な熱可塑性樹脂を使って全く同じエンボスホログラムが大量生産できることから、現在世の中にでている複製ホログラムのほとんど全てがこの方法によっている。

複製ホログラムがようやく形になりはじめた頃（日本では昭和57年、雑誌「応用物理」にホログラムが添付された¹³⁾頃であるが）に使用されていた被プレス材料は厚さ0.4mm程度のポリ塩化ビニールであり、この厚さでは利用範囲が限られていた。最近では極薄の材料を使用し、またホログラムを転写箔構成に仕上げることににより、通常の印刷と同様の形態がとれるようになった¹⁴⁾。転写というのは印刷技術の一つで、直接被印刷物に印刷するのが困難な場合、いったん文字、図柄を転写紙あるいは転写箔に印刷しておき、これを被転写物の表面に絵付けする方法である。この技術を用いることにより、短期間に大量にかつ安価なホログラムができるようになり、本の表紙、パッケージ、クレジットカードなど一般の生活の中の商品にまで使われるようになってきた。ホログラムの場合は転写箔の形になっており、図6のような構成である。ホログラム層は2 μm 程度の厚みで、凹凸面に反射層を付け反射で再生像がみられる。転写は転写箔と被転写物とを重ね上下より熱圧をかけて行なわれる。転写箔の最下層の接着層が溶け、被転写物に接着する。その後転写箔を持ち上げると、ベースフィルムと離

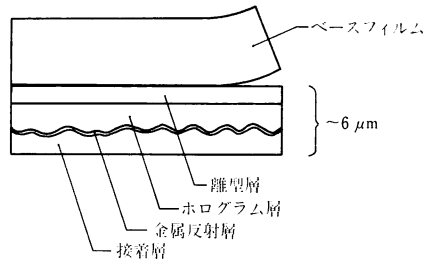


図6 ホログラム転写箔の構成

型層との間で剥離が起りホログラムが転写される。転写される層全体の厚さは6 μm 程度であり、厚みを感じさせないホログラムが被転写物の表面に形成される。転写の位置を正確にコントロールしたい場合が多く、このために自動位置検出装置を備えた転写機も開発されている。

4. 記録材料の開発と処理

ホログラムが立体像表示の手段として使えるためには大型で再生像が明るくなければならない。これは使用する記録材料に大いに依存する。

各種のホログラフィ用記録材料のなかで、銀塩乳剤は最も感度が高く手軽に入手できるためよく使われている。解像力も向上してきており、比較的新しく開発されたAgfa社のHolotest 8E75 HD, 8E56 HD乳剤は粒子サイズが30nm、解像力は5000本/mmとされている。ごく最近Ilford社から7000本/mmの解像力をもつというSP673, SP672乳剤が発表された¹⁵⁾。これらの乳剤はリップマンホログラムの記録に適している。現像処理法も改良されており、現像後は定着処理を除いて漂白し未露光部の銀塩もホログラム内に残して、乳剤の収縮変形によるノイズの発生を防ぐ方向にある。その一例がCW-C2現像, PBQ-2漂白処理であり、8E75 HD乳剤にリップマンホログラム格子を記録したとき70%程度の回折効率が得られる¹⁶⁾。

他の記録材料として、重クロム酸ゼラチンは高効率で低ノイズの位相ホログラム用記録材料としてホログラフィック光学素子、ディスプレイ用ホログラムのために欠かせない重要なものとなっている。

フォトポリマーも優れた特性を示す。ポリビニールカルバゾール樹脂を主成分として用いることにより488nmの光に対して10mJ/cm²で回折効率35%, 50mJ/cm²で97%が得られている¹⁷⁾。Polariod社のDMP-128¹⁷⁾はパンクロマチックで感度も高い。透過型ホログラムで80%の回折効率を得るのに必要な露光量は5

mJ/cm², リップマンホログラムでも 30 mJ/cm² である。フォトポリマーは重クロム酸ゼラチンと似た特性を示すが、処理に全く水を使わないこと、また高湿度の下でも安定であることが特徴である。この材料は今のところ市販されていないが、期待できる材料である。

5. おわりに

ホログラフィによる立体像表示について、主に技術サイドの最近の進展を紹介した。この方面の研究は着実に進んでいるようにみえる。最近、再びホログラフィ関連の国際会議が増えており、その会場では各自ホログラムを持ちよって技術を披露しあう展示コーナーが設けられることが多くなってきた。こうした会議には従来のように研究者だけというのではなく、芸術系の人々、ホログラムを企業化しようとする人々など広い分野の人々が参加するようになってきている。

ホログラフィ本来の特徴を生かしたディスプレイへの利用が活発になってゆくためには、技術の進展だけでなくその上にたった普及活動が必要であることはいうまでもない。この点に関しては、アメリカを初めヨーロッパの多くの国には常設のミュージアム、ギャラリーがあり、活発な活動が行なわれている。このような海外における動きについてはホログラフィック・ディスプレイ研究会会誌に機に応じて紹介されている。日本では残念ながらまだミュージアム設立の動きはなく立ち遅れているといわざるをえない。地道な普及活動を通してホログラフィ人口を増やし、広い分野でホログラフィが応用されてゆくことを期待したい。

最後に、マルチプレックスホログラムからの再生像(図5)の写真を提出していただいた東京工業大学の辻内順平教授、本田捷夫助教授を初め、それぞれの立場から貴重な情報を寄せてくださったホログラフィック・ディスプレイ研究会の皆様へ深く感謝します。

文 献

- 1) 小瀬輝次: "白色光再正ホログラフィックディスプレイ(I)", 日本写真学会誌, **45** (1980) 251-260.
- 2) S. A. Benton: "'Alcove' hologram for computer-aided design," O-E Lase '87 and EO Imaging (SPIE, Los Angeles, 1987) Technical program, p. 56.
- 3) 池上皓治: "レインボウ・ホログラムの視域拡大(II)", ホログラフィック・ディスプレイ研究会会誌, No. 3 (1983) 9-14.
- 4) P. Hariharan: "Colour holography," *Progress in Optics*, Vol. XX, ed E. Wolf (North-Holland, Amsterdam, 1983) pp. 265-324.
- 5) P. Hariharan: "Improved techniques for multicolour reflection holograms," *J. Opt. (Paris)*, **11** (1980) 53-55.
- 6) T. Kubota: "Recording of high quality color hologram," *Appl. Opt.*, **25** (1986) 4141-4145.
- 7) R. T. Ingwall and H. L. Fielding: "Hologram recording with a new Polaroid photopolymer system," *Proc. SPIE*, **523** (1985) 306-312.
- 8) S. L. Smith: "Application of the tri-color theory of additive color mixing to the full color reflection hologram," *Proc. SPIE*, **523** (1985) 42-46.
- 9) K. Bazargan: "A practical, portable system for white-light display of transmission holograms using dispersion compensation," *Proc. SPIE*, **523** (1985) 24-25.
- 10) S. A. Benton: "Achromatic holographic stereograms," *J. Opt. Soc. Am.*, **71** (1981) 1568A.
- 11) K. Okada and T. Ose: "Holographic three-dimensional display of X-ray tomogram," *The International Conference on Holography Applications' 1986, Beijing, Conference digest* (1986) pp. 37-38.
- 12) N. Ohyama, Y. Minami, A. Watanabe, J. Tsujiuchi and T. Honda: "Multiplex holograms of a skull made of CT images," *Opt. Commun.*, **61** (1987) 96-99.
- 13) 応用物理, **51**, No. 5 (創刊50周年記念特集号—光学—) (1982).
- 14) 山崎哲司: "ホログラムの印刷," *O plus E*, No. 77 (1986) 51-56.
- 15) G. P. Wood: "New silver halide materials for the mass production of holograms," *Proc. SPIE*, **615** (1986) 74-80.
- 16) D. J. Cooke and A. A. Ward: "Reflection-hologram processing for high efficiency in silver-halide emulsions," *Appl. Opt.*, **23** (1984) 934-941.
- 17) K. Matsumoto, T. Kuwayama, M. Matsumoto and N. Taniguchi: "Holographic optical elements using polyvinyl carbazole holographic material," *Proc. SPIE*, **600** (1985) 9-13.